



Fonctionnement optimal d'une pompe à chaleur thermoélectrique (PACTE) air-air pour différents couplages à un bâtiment basse consommation (BBC).

GDR Thermoélectricité 2012, 05 Décembre

Responsables du projet : M. Pascal DALICIEUX
M. Philippe BARANEK

Directeur de thèse: M. Gilles FRAISSE
Co-encadrant: M. Julien RAMOUSSE



KIM Yeweon



PLAN

○ Contexte

- Contexte global et solution potentielle
- Qu'est-ce qu'une PACTE ?

○ Modélisation de la PACTE

- Equations de la thermoélectricité

○ Optimisation pour les conditions instantanées

- 1^{er} scenario : **Couplage PACTE à T_{ext}**
- 2^e scenario : **Couplage PACTE avec un échangeur statique (amont)**
- 3^e scenario : **Couplage PACTE avec un puits canadien**

○ Optimisation pour les conditions saisonnières

- Évaluation du **COP_s** en fonction du **climat**, pour les **différents couplages**

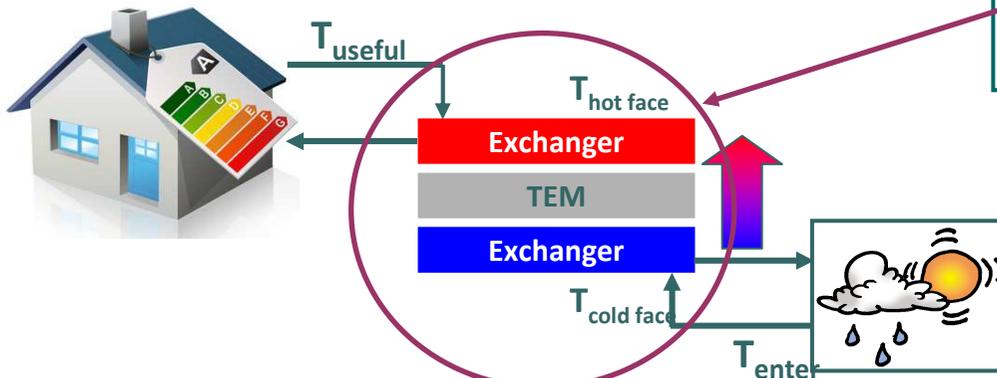
○ Conclusion

CONTEXTE

Contexte global



Solution potentielle : PACTE



PACTE :COP intéressants pour faibles ΔT
 →BBC : VMC Double Flux avec recyclage d'air
 →Intensification des transferts dans les échangeurs

Figure1 Exemple de couplage d'une PACTE à un BBC

Qu'est-ce qu'une PACTE ?

-Fonctionnement

- Modules Thermoélectriques (TEM)
- Application d'un courant électrique
- Transfert de la chaleur d'une source froide vers une source chaude

-Avantages

- Pas de pièce mobile (nuisance sonore, maintenance)
- Pas de fluide frigorigène (impact environnemental réduit)
- Faible coût

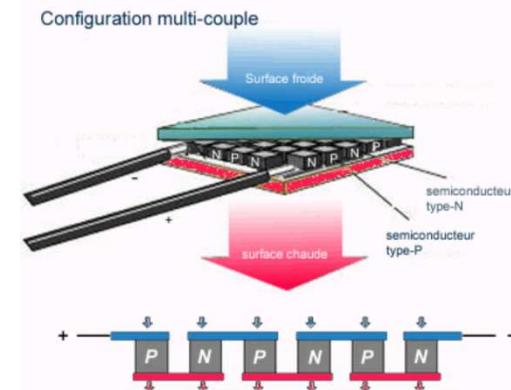


Figure2 Pompe à chaleur thermoélectrique (PAC TE)

MODELISATION

-Equations de la thermoélectricité

Modèle simplifié:

$$Q_c = N \left(\alpha \cdot T_c \cdot i + \frac{1}{2} \cdot R \cdot i^2 - K \cdot \Delta T_{cep} \right)$$

Peltier Joule Conduction

$$Q_f = N \left(\alpha \cdot T_f \cdot i - \frac{1}{2} \cdot R \cdot i^2 - K \cdot \Delta T_{cep} \right)$$

$$P_{elec} = Q_c - Q_f = \alpha(T_c - T_f) \cdot i + R \cdot i^2$$

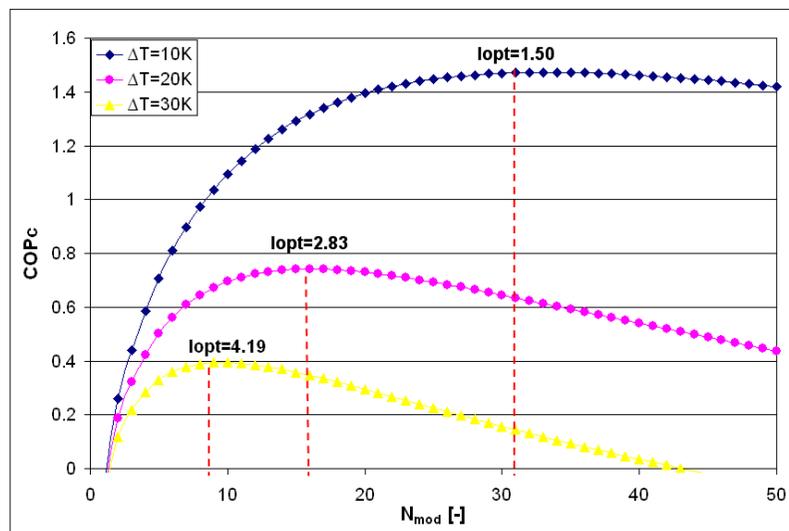
Coefficient de Performance

$$COP_c = \frac{Q_c}{P_{elec}}$$

Caractéristiques TEM

Ref. 9501/242/160 B, Ferrotec

Description	Dimension
Dimension de CEP	55x55x3.45 (mm ³)
Nombre de paires de jambe	242 (-)
Resistance électrique	1.7352 (Ω)
Coefficient Seebeck	0.201 (V/K)
Résistance thermique de jambe	2.6637 (K/W)
Résistance thermique d'échangeur	0.001 (K/W)
T _{int}	20 (°C)
T _{ext_base}	-10 (°C)



Donnée: $T_c=293\text{ K}$, $Q_c=1000\text{ W}$

→ Existence d'un point de fonctionnement optimal (COP_{max}) pour toute condition de températures

→ Lorsque $\Delta T \downarrow$: $l^{opt} \downarrow$, $N_{mod}^{opt} \uparrow$

Figure3. COP_c en fonction de ΔT et Nombre de modules optimal



Hypothèses

- **Objectif:** Optimiser le fonctionnement d'une PACTE couplée au bâtiment (maximiser COP)

○ PACTE

- 1 TEM \rightarrow COP_{max} correspond à $(I^{opt} ; Q_c^{opt})$
- N_{mod} TEM \rightarrow COP_{max} correspond à $(I^{opt} ; Q_c^{besoin})$

- **Recherche du nombre de modules optimal et de l'intensité optimale :** pour répondre aux besoins de chauffage dans le bâtiment en fonction de la température de la source.

- $Q_c^{besoin} = Q_c^{opt} \times N_{mod}^{opt}$

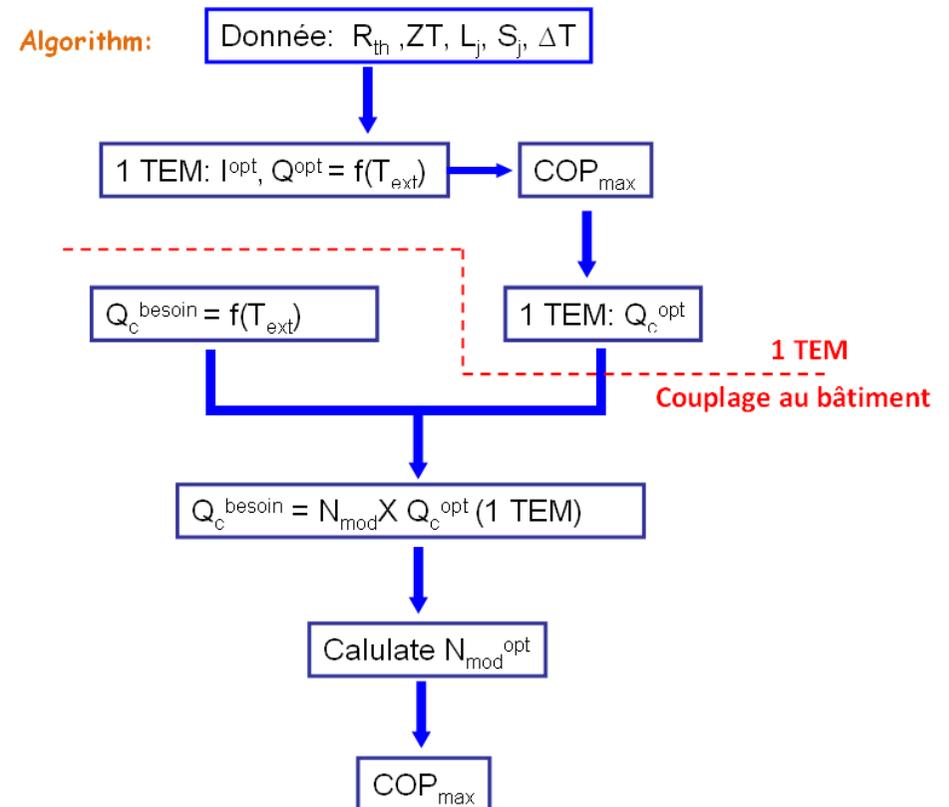


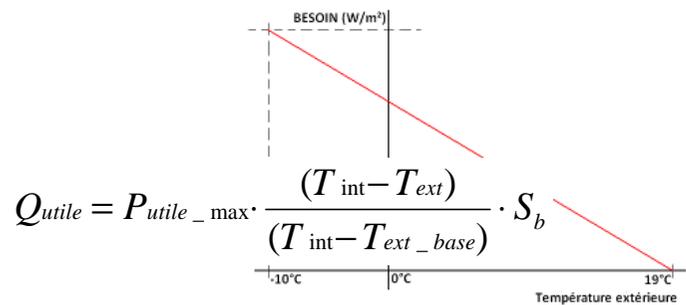
Figure4 Algorithme pour obtenir le nombre de module optimal

Hypothèses

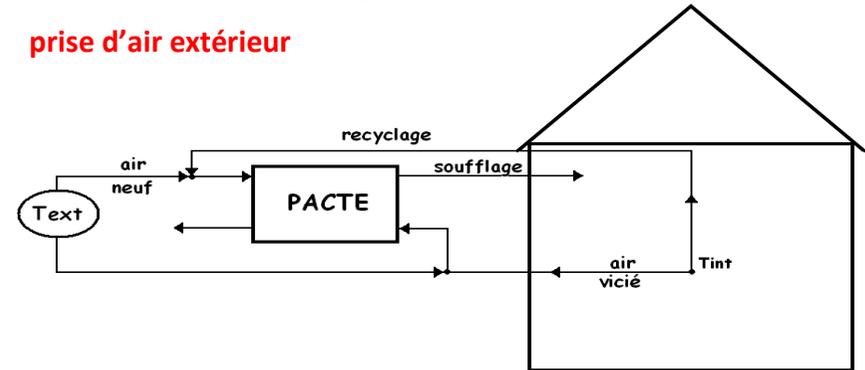
-Intégration au bâtiment avec 3 scenario

-Bâtiment

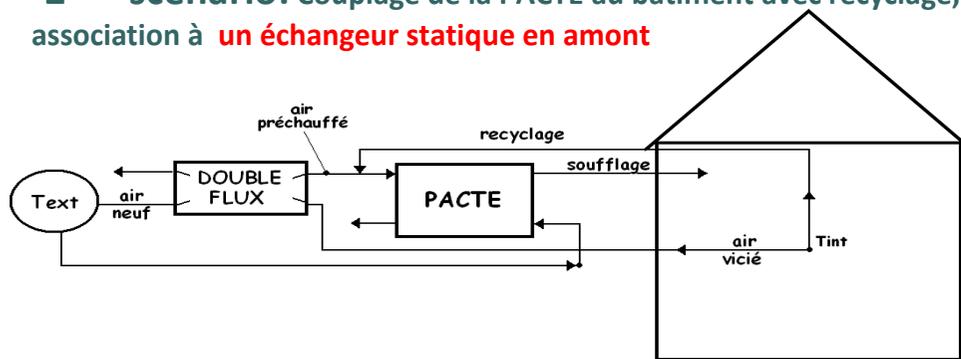
- Bâtiment INCAS (INES): 97.5m²x2.7m soit 263.3m³
- P_{utile} dépend de T_{ext} (besoin de chauffage variable):
- P_{utile}^{max}=20 W/m² (Trappes)
- Régime permanent dans le bâtiment (T_{int}=19°C)



-1^{er} scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, avec prise d'air extérieur

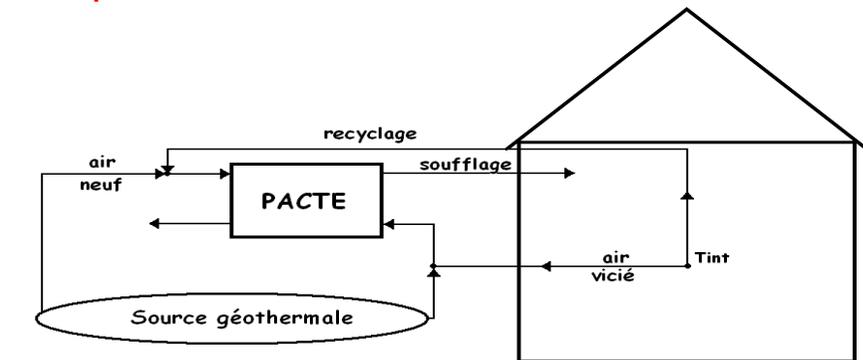


-2^{eme} scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment avec recyclage, association à un échangeur statique en amont



6

GDR Thermoélectricité 2012

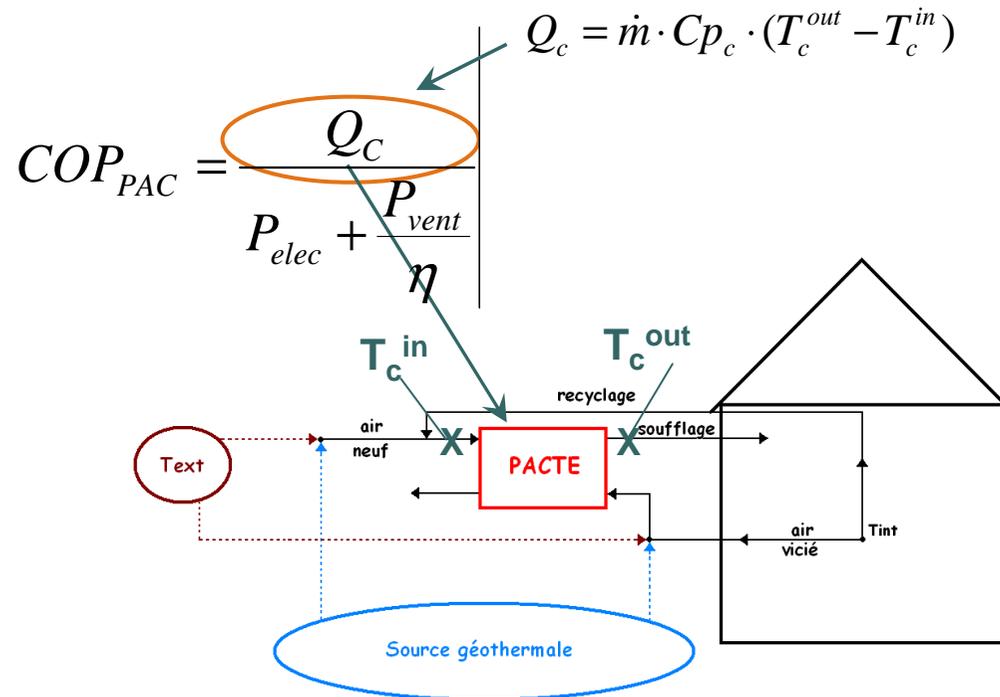


13/12/2012

Hypothèse

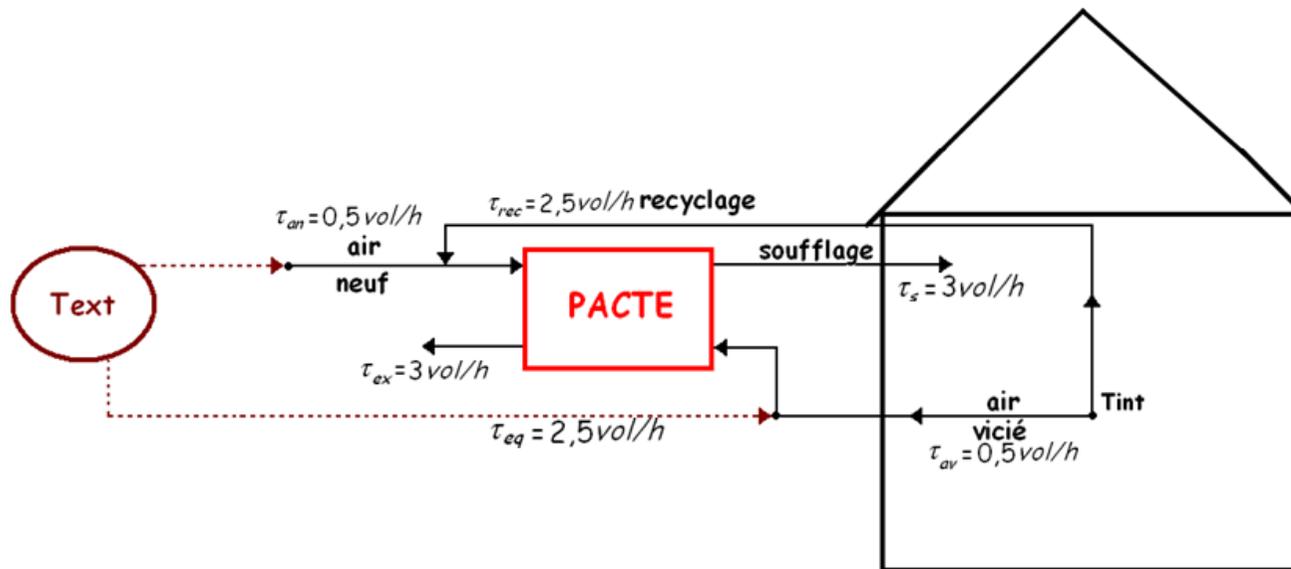
- Calcul du COP_{PAC}

- COP_{PAC} : COP prenant en compte la puissance côté chaud de la PACTE normée par la puissance consommée et par les auxiliaires de circulation P_{vent} ($P_{vent} = 0.1 \text{ [W/m}^3\text{]}$ avec un rendement $\eta = 0.7$)



Scénario 1

- 1^{er} scénario: Couplage de la PACTE au bâtiment, avec prise d'air extérieur.



- Conditions de fonctionnement:

- $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$ (loi de chauffe)

- T_{int}

- N_{mod}

- Données:

- $R_{th} = 0.001 [\text{W/K}]$

- $P_{vent} = 0.1 [\text{W/m}^3]$

- **Côté chaud:** l'air entrant est pris directement à l'extérieur du logement (0.5 vol/h).

Un mélange est effectué avec de l'air recyclé (2.5 vol/h).

- **Côté froid:** l'air vicié (0.5 vol/h) est mélangé à un débit d'air extérieur (2.5 vol/h)

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à 3 vol/h

Optimisation pour les conditions instantanée

• 1^{er} scénario : Couplage à T_{ext}

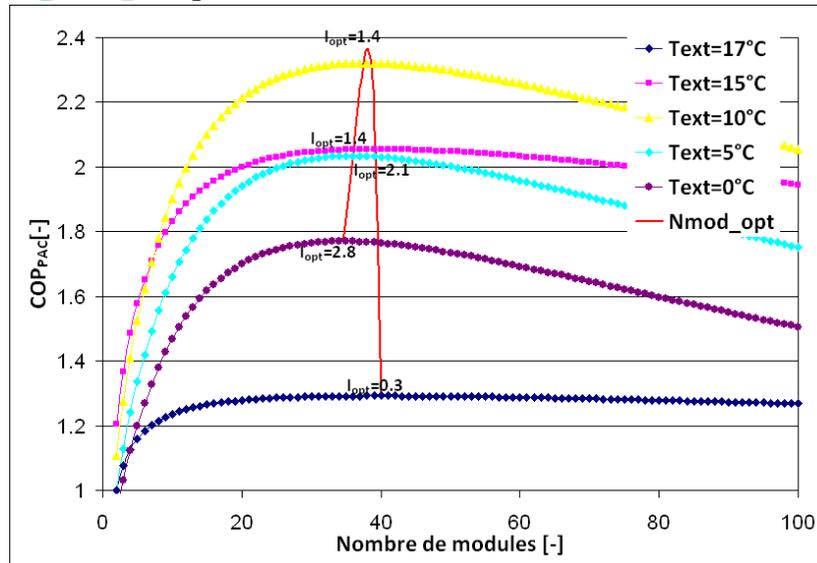


Figure 6 : COP_{pac} en fonction de l'intensité et du nombre de modules ($T_{entrée} = T_{ext}$)

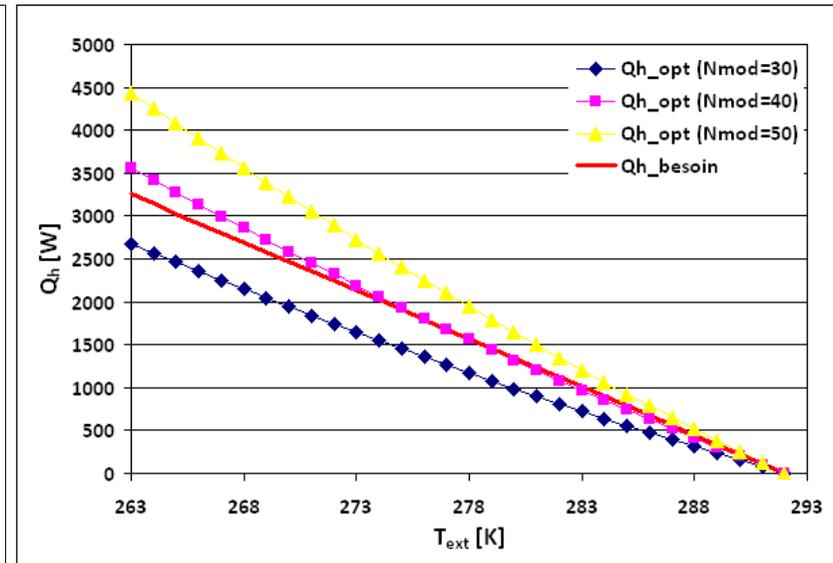


Figure 7 : Q_c^{besoin} et Q_c^{opt} en fonction de T_{ext} et du nombre de modules ($T_{entrée} = T_{ext}$)

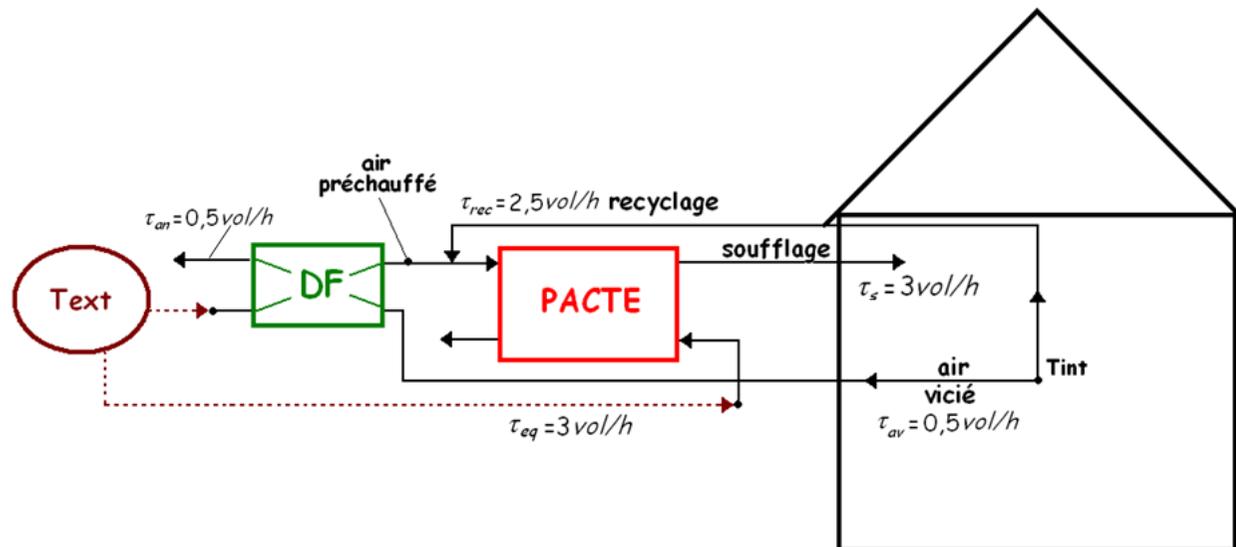
Q_c^{opt} : Puissance thermique optimale fournie par N_{mod} selon la T_{ext}
 Q_c^{besoin} : Puissance thermique nécessaire au bâtiment selon la T_{ext}

Scénario1

- $T_{ext} \uparrow \rightarrow I_{opt} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est à 40.
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit T_{ext}**

Scénario 2

- 2^{eme} scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, association à **un échangeur statique**



- Conditions de fonctionnement:

- $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$ (loi de chauffe)

- T_{int}

- N_{mod}

- Données:

- $R_{th} = 0.001 [W/K]$

- $P_{vent} = 0.1 [W/m^3]$

- **Côté chaud:** l'air entrant est préchauffé par l'air vicié (0.5 vol/h)
Un mélange est effectué avec de l'air recyclé (2.5 vol/h).

- **Côté froid:** un débit d'air extérieur est ajusté de manière à équilibrer les débits de part et d'autre de la PACTE (3 vol/h)

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à 3 vol/h

Optimisation

• 2^e scénario : Couplage à un amont échangeur statique

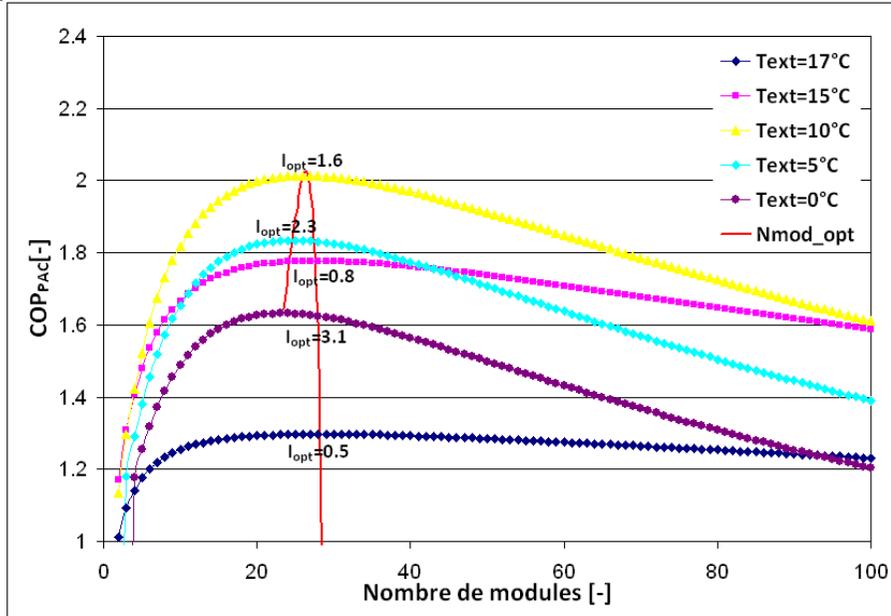


Figure 8 : COP_{PAC} en fonction de l'intensité et du nombre de modules ($T_{\text{entrée}}=T_{\text{ext}}$)

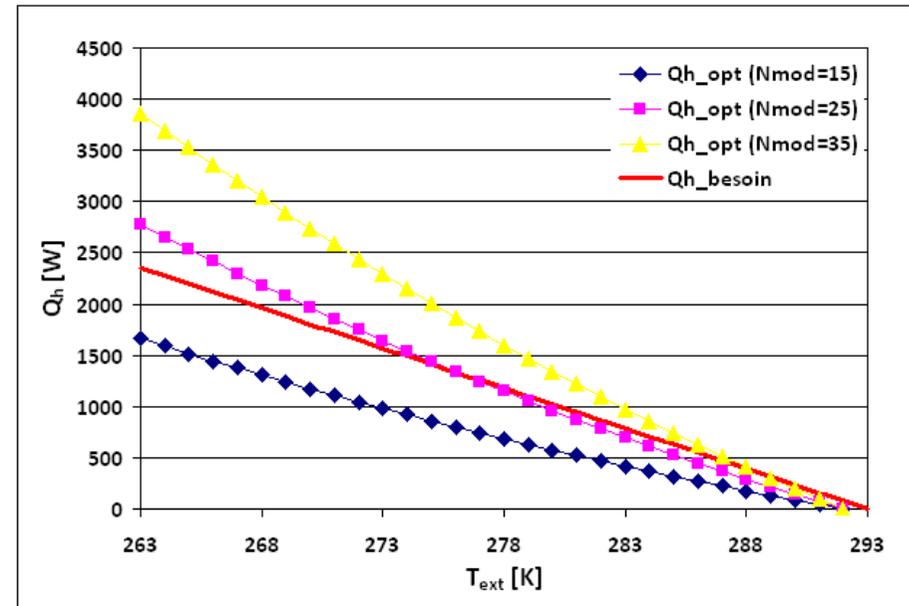


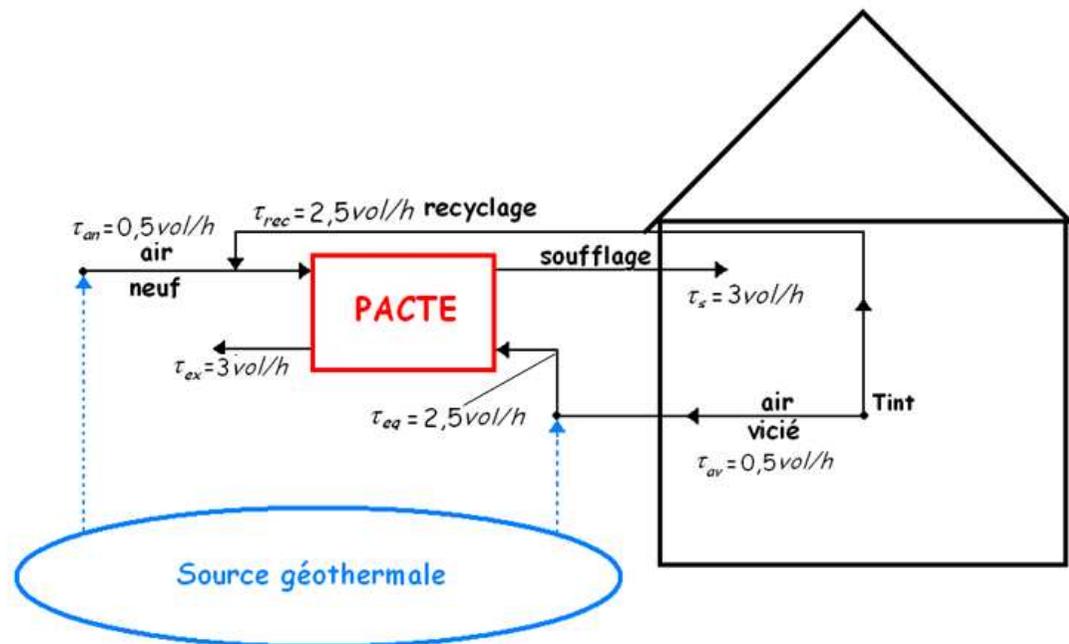
Figure 9 : Q_c^{besoin} et Q_c^{opt} en fonction de T_{ext} et du nombre de modules ($T_{\text{entrée}}=T_{\text{ext}}$)

Scénario2

- $T_{\text{ext}} \uparrow \rightarrow I_{\text{opt}} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est à 25.
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit T_{ext}**

Scénario 3

- 3^{eme} scenario: Couplage de la PACTE au bâtiment, association à **un system puits canadien.**



- Conditions de fonctionnement:

- $T_{ext} \rightarrow P_{utile}$ (loi de chauffe)

- T_{int}

- N_{mod}

- Données:

- $R_{th} = 0.001 [\text{W/K}]$

- $P_{vent} = 0.1 [\text{W/m}^3]$

- **Côté chaud & Côté froid :** l'air entrant est pris directement à l'extérieur du logement comme 1^{er} scenario.

Ajout de puits canadien

- ▶ Lorsque, $T_{ext} < 10^\circ\text{C} \rightarrow T_{puits} = 10^\circ\text{C}$
- ▶ Lorsque, $T_{ext} > 10^\circ\text{C} \rightarrow T_{puits} = T_{ext}$

→ Le débit d'air total circulant de part et d'autre de la PACTE est fixé à 3 vol/h

Optimisation

- 3^e scénario : Couplage à T_{geo}

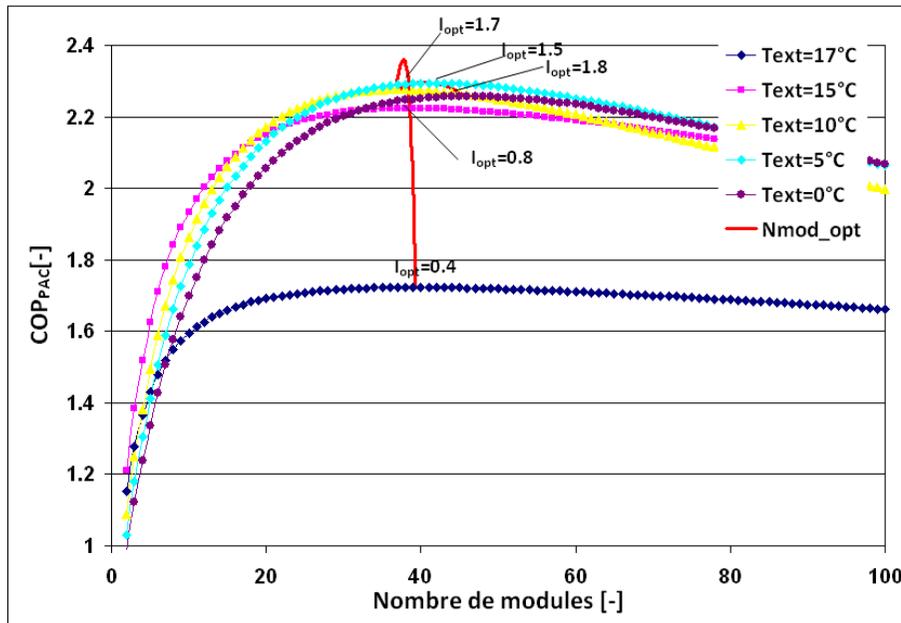


Figure 10 : COP_{PAC} en fonction de l'intensité avec différents nombres de modules ($T_{entree}=cst.$)

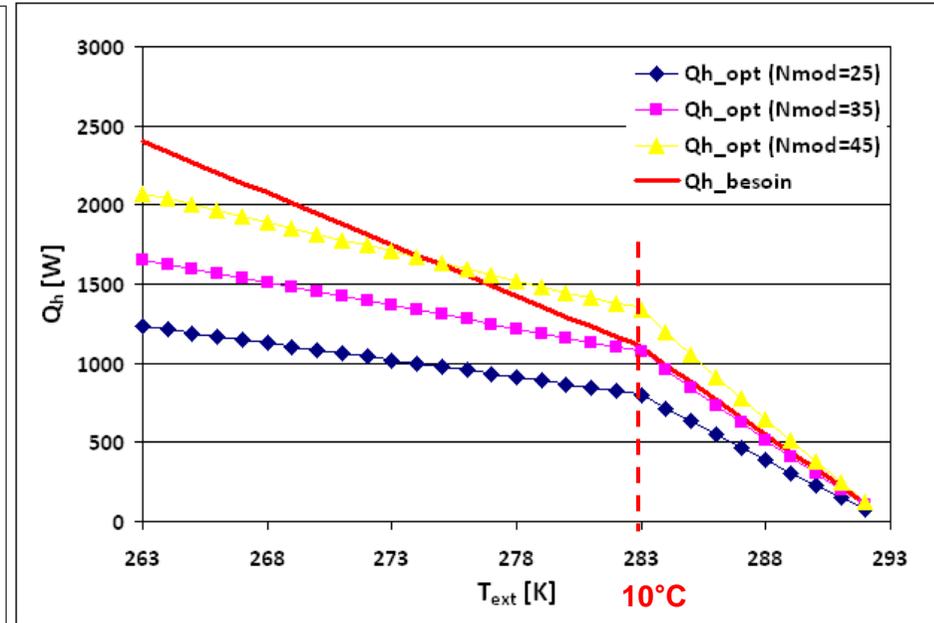


Figure 11 : Q_c^{besoin} et Q_c^{opt} en fonction de T_{ext} et du nombre de modules ($T_{entree}=cst.$)

Scénario3

- $T_{ext} \uparrow \rightarrow I_{opt} \downarrow$
- Dans ce cas le nombre de modules optimum est compris entre 35-40
- **Il existe un nombre de modules optimal quelle que soit T_{ext}**
- Variation du COP_{PAC} est moins sensible selon les N_{mod} par rapport scénario 1 et 2.

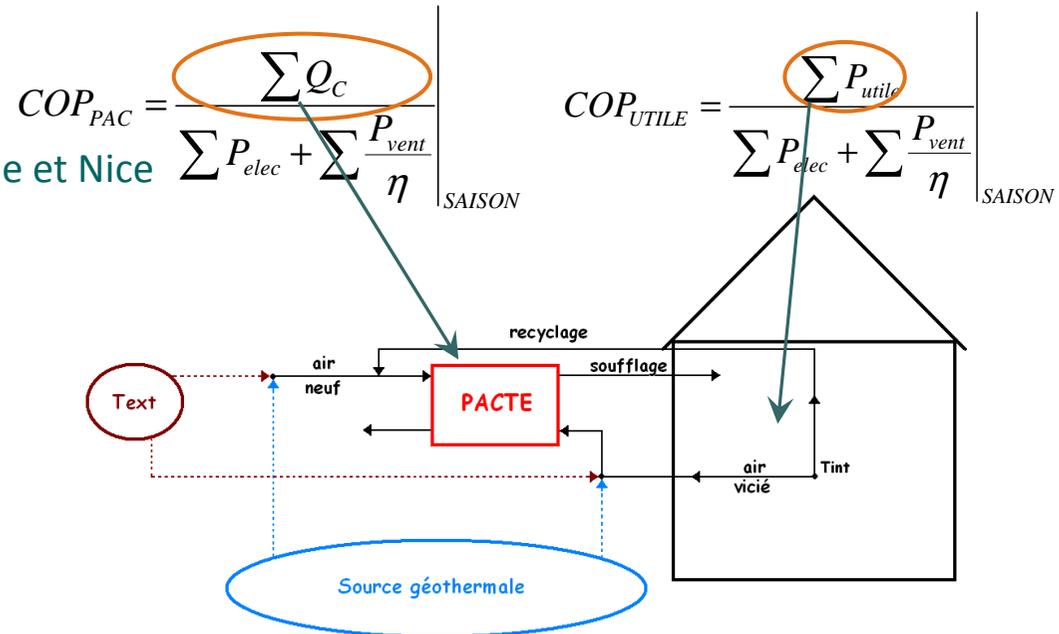
Couplage au bâtiment

- Calcul des différents COP

- **COP_c** : COP prenant en compte la puissance chaude de la PAC sans P_{vent}
- **COP_{PAC}** : COP prenant en compte la puissance chaude de la PAC avec P_{vent}
→ Intérêt pour les fabricants
- **COP_{UTILE}** : COP prenant en compte la puissance à fournir au bâtiment avec P_{vent}
→ Intérêt pour les utilisateur

○ Climats

- Villes retenues : Trappes, La Rochelle et Nice



Determination P_{utile} a l'aide du logiciel TRNSYS

Optimisation pour les conditions saisonnières

Trappes

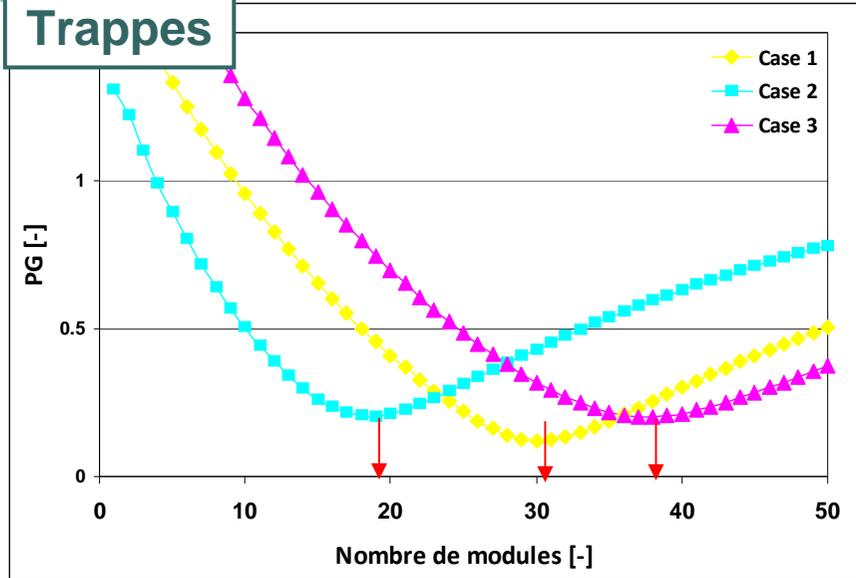


Figure 12 : Performance Gap entre le COP_{pac}^{opt} et le COP_{pac}

$$PG = COP_{PAC}^s(N_{mod}) - COP_{PAC}^s(N_{mod}^{opt}(T_{ext}))$$

Variable $N_{mod} \in [1;50]$ N_{mod}^{opt} cst.

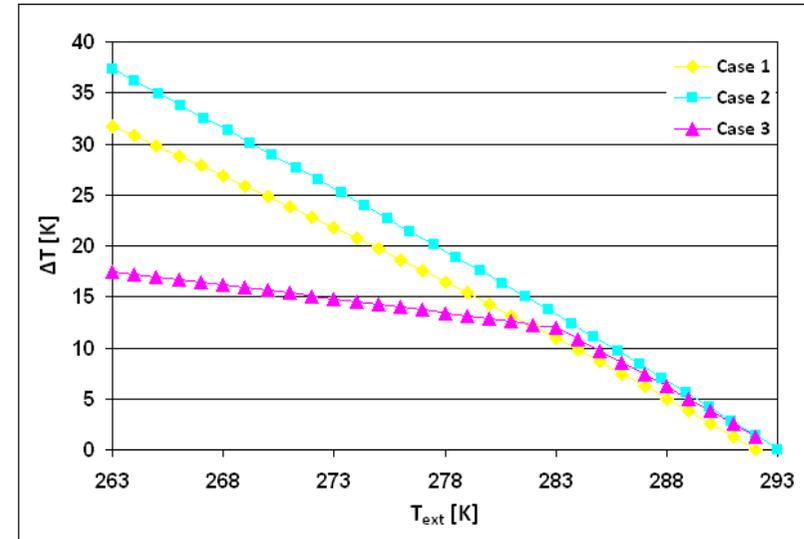


Figure 13 : différence de températures entre deux face de module en fonction de T_{ext}

• **Il existe un nombre de modules optimal pour des condition saisonnières**

• N_{mod}^{opt} dépendent de l'écart température (ΔT) entre les deux faces des modules

ΔT : Scenario 3 < Scenario 1 < Scenario 2

N_{mod}^{opt} : Scenario 3 > Scenario 1 > Scenario 2

Lorsque $\Delta T \downarrow$ $N_{mod}^{opt} \uparrow$

COP relatif à la PAC (COP_{PAC})

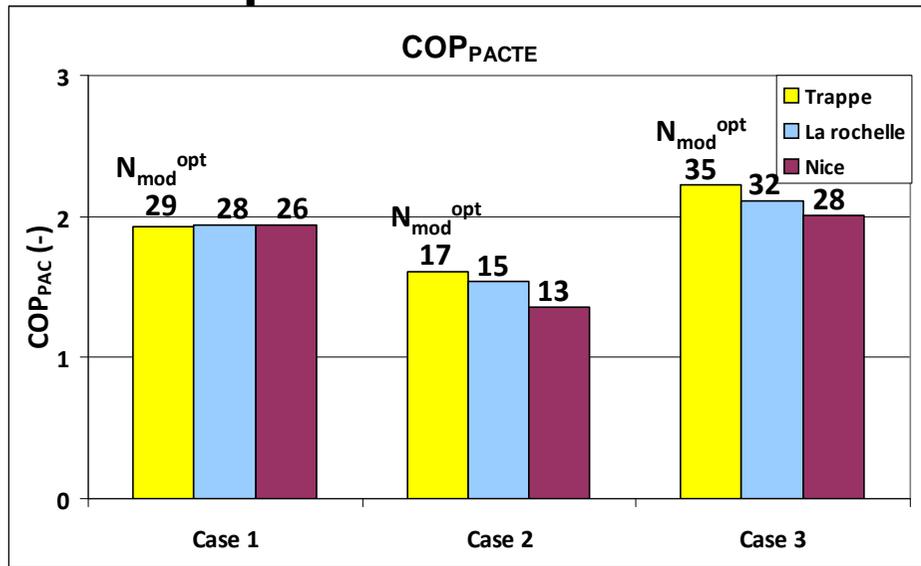


Figure 14 : Evolution du COP_{PAC} et N_{mod}^{opt} en fonction du climat, pour les différents couplages

Trappes						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COP_{PAC}
Case1		4.61	1.82		0.86	1.9
Case2	2.1	2.85	1.16	0.61	1.18	1.61
Case3		3.65	1.01		1.25	2.24
La Rochelle						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COP_{PAC}
Case1		2.33	0.81		0.78	1.94
Case2	0.93	1.35	0.49	0.39	1.06	1.54
Case3		1.91	0.49		0.96	2.11
Nice						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COP_{PAC}
Case1		1.07	3.12		0.61	1.94
Case2	0.34	0.56	0.17	0.24	0.82	1.36
Case3		0.92	0.22		0.73	2.01

Figure 15: Bilan des énergies mises en jeu pour les différents couplage et climat

- Le nombre de modules optimal (N_{mod}^{opt}) est influencé par le mode de couplage
- COP_{PAC} :
 - ✓ Case3 > Case1 > Case 2
 - ✓ Trappe > La rochelle > Nice
- COP_{PAC} est plus intéressant à Trappes et à La Rochelle
 - ✓ La P_{vent} devient élevée par rapport Q_h/P_{utile} dans les région chaude (Nice).

COP relatif au couplage PAC-BBC (COP_{utile})

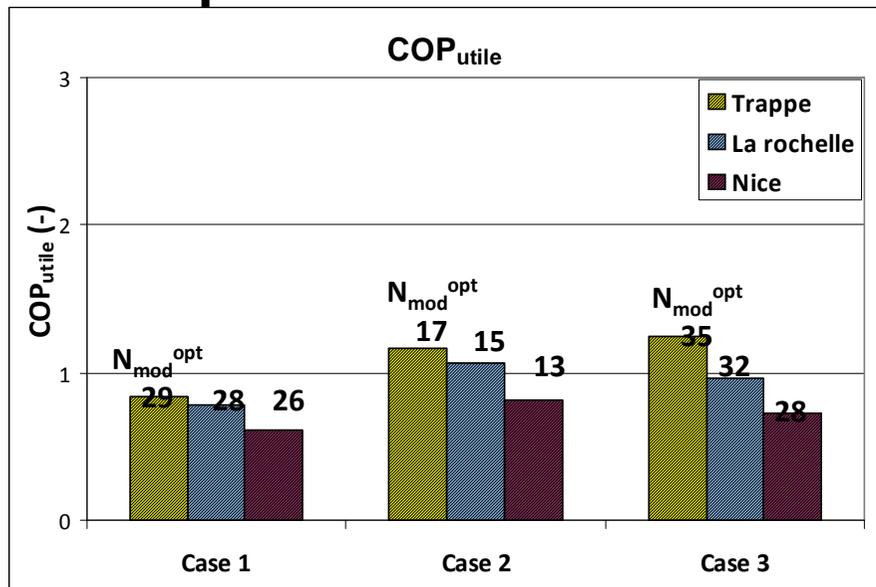


Figure 15 : Evolution du COP_{utile} en fonction du climat, pour les différents couplages

Trappes						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COPPAC
Case1		4.61	1.82		0.86	1.9
Case2	2.1	2.85	1.16	0.61	1.18	1.61
Case3		3.65	1.01		1.25	2.24
La Rochelle						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COPPAC
Case1		2.33	0.81		0.78	1.94
Case2	0.93	1.35	0.49	0.39	1.06	1.54
Case3		1.91	0.49		0.96	2.11
Nice						
Couplage	ΣP_{utile} (MWh)	ΣQ_c (MWh)	ΣP_{elec} (MWh)	ΣP_{vent} (MWh)	COP_{utile}	COPPAC
Case1		1.07	3.12		0.61	1.94
Case2	0.34	0.56	0.17	0.24	0.82	1.36
Case3		0.92	0.22		0.73	2.01

Figure 15: Bilan des énergies mises en jeu pour les différents couplage et climat

- La valeur COP_{PAC} est plus intéressant que la valeur COP_{utile}
- COP_{utile} :
 - ✓ Case3 > Case2 > Case1
 - ✓ Trappe > La rochelle > Nice
- L'association de la PACTE à d'autres systèmes peut aider à amélioration du COP_{utile} (un système avec un échangeur statique amont ou avec capteur géothermique)

Conclusions & Perspectives

○ Modélisation

- Réalisation d'un modèle simplifié
- Etude du couplage PACTE / Bâtiment
→ Détermination de performances instantanées & saisonnières

○ Optimisation pour les conditions instantanées

- Détermination de $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$
Scénario 1 : Couplage à T_{ext} : $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$ existe : 40 modules
Scénario 2 : Couplage à T_{ext} : $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$ existe : 25 modules
Scénario 3 : Couplage à T_{geo} : $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$ existe : 35-40 modules
- $N_{\text{mod}}^{\text{opt}}$ dépend de l'écart de températures (ΔT) entre les deux face du module

○ Optimisation pour les conditions saisonnières.

- $\text{COP}_{\text{utile}}$ est toujours peu performant (ne dépasse pas 1.25 : Trappes avec cas 3) par rapport au COP_{PAC} (maximum 2.11: La Rochelle avec cas 3)
- L'association de la PACTE à d'autres systèmes peut aider à amélioration du $\text{COP}_{\text{utile}}$

○ Perspectives

- Réduire le débit pour les températures chaudes pour réduire la part de la P_{vent} dans l'expression du $\text{COP}_{\text{utile}}/\text{COP}_{\text{PAC}}$ pour améliorer la performance.
- Etude avec appoint pour favoriser le fonctionnement de la PACTE.



**MERCI
POUR
VOTRE ATTENTION**